

Известия Томского политехнического университета. Инжиниринг георесурсов. 2016. Т. 327. № 4. 88–96
Зыкова Ю.А., Самохвалов Н.М., Виноградов В.В. Сопротивление пылевого осадка в щелевом фильтре

УДК 532.5.013.12: 532.559.8

СОПРОТИВЛЕНИЕ ПЫЛЕВОГО ОСАДКА В ЩЕЛЕВОМ ФИЛЬТРЕ

Зыкова Юлия Александровна¹,
ulya2279@mail.ru

Самохвалов Николай Митрофанович¹,
htnv@istu.edu

Виноградов Владимир Владимирович¹,
vvv158@mail.ru

¹ Иркутский национальный исследовательский университет,
Россия, 664074, г. Иркутск, ул. Лермонтова, 83.

Актуальность работы. Природный газ, добываемый из скважин на месторождениях, не является товарной продукцией, так как содержит множество примесей, в том числе механических. Поэтому добытый газ направляется на установки комплексной подготовки газа, где одним из этапов технологического цикла является очистка от механических примесей. Актуальность работы обусловлена необходимостью изучения гидравлического сопротивления пылевого осадка в новом, ранее не изученном устройстве для очистки запыленных газов фильтрованием – щелевом фильтре. Существующие сегодня методы расчета прироста гидравлического сопротивления не применимы для данных пылеулавливающих устройств.

Цель исследования: проведение лабораторных испытаний щелевого фильтра с целью определения вариантов формирования осадка и их математического описания и разработка методики расчета прироста гидравлического сопротивления при очистке запыленных газов.

Методы исследования основаны на результатах физического моделирования процесса фильтрования запыленных газов с целью определения прироста гидравлического сопротивления и теоретическом анализе уравнения Дарси для механизмов образования осадка и закупоривания пор применительно к щелевому фильтру.

Результаты. Представлены теоретические зависимости по расчету гидравлического сопротивления при очистке запыленных газов в щелевом фильтре для механизмов фильтрования с образованием осадка и с закупориванием пор, полученные на основе преобразований уравнения Пуазейля. Рассмотрено сравнение расчетных данных с использованием этих уравнений с опытными данными. Показано, что сходимость опытного и расчетного прироста сопротивления по механизму с образованием осадка составляет в среднем 10 %, а по механизму с закупориванием пор наблюдалось существенное отклонение более чем в 100 %. Представлена зависимость по расчету удельного сопротивления пылевого осадка, которая в отличие от уравнений Эргана и Козени–Кармана учитывает кривизну каналов в слое пыли. Предложена математическая модель, учитывающая механизм фильтрования с образованием осадка, которая положена в основу расчета гидравлического сопротивления щелевого фильтра.

Выводы. Разработанная методика расчета позволяет с достаточной степенью точности рассчитать гидравлическое сопротивление щелевого фильтра с учетом характеристик фильтрующей перегородки и физических свойств пыли и газа в зависимости от скорости потока, продолжительности очистки и запыленности газа. Данная методика позволяет моделировать и проектировать щелевые фильтры с минимальным значением гидравлического сопротивления, что позволит снизить эксплуатационные затраты.

Ключевые слова:

Щелевой фильтр, гидравлическое сопротивление, фильтрование, закупоривание пор, образование осадка, пылеочистка.

Для очистки запыленных газов фильтрованием определенным интерес представляет щелевой фильтр с простой и эффективной системой регенерации фильтрующего слоя [1]. В этом фильтре в качестве фильтрующей перегородки используется слой металлической проволоки, навитой в несколько рядов на каркас в виде «белчьего колеса» или перфорированный цилиндр. Такой фильтрующий слой обладает механической прочностью и хорошей фильтрующей способностью. Его можно использовать для высокоэффективной очистки горячих, коррозионных и абразивных сред. Известные способы очистки и аппараты не всегда пригодны к работе в таких условиях.

Очистка запыленных газов фильтрованием представляет сложный процесс, зависящий от многих факторов. Теоретический анализ и экспериментальные исследования показали, что основные закономерности, характерные для фильтрова-

ния суспензий, в целом справедливы и для газов, но при этом имеются и отличительные особенности. Обычно фильтрование газов протекает при более высоких скоростях потока и сопровождается проскоком пыли. Плотность и вязкость газового потока значительно меньше, чем у жидкости, что существенно влияет на гидродинамику процесса [2–9].

Известные методы расчета гидравлического сопротивления при фильтровании запыленных газов основываются на эмпирическом законе Дарси. Теория фильтрования построена на «идеальном» фильтре с равномерными и цилиндрическими каналами, а для оценки реальных процессов используются опытные поправки. Получение таких поправок требует тщательного эксперимента и учета многих трудно определяемых факторов. Ранее исследования гидравлического сопротивления при использовании щелевых фильтров для очистки га-

за от пыли не проводились, что составляет дополнительные трудности для оценки результатов экспериментов.

Объекты и методы исследований

Объектом исследования являлась щелевая фильтрующая перегородка со сменным числом слоев и различным диаметром проволоки. Гидравлические сопротивления измерялись микроманометром с наклонной трубкой ММН-240. Расход воздуха – с помощью ротаметра РМ-04–10 ГУЗ. Исследовалось гидравлическое сопротивление фильтра при очистке воздуха от нейтрального гипохлорита кальция, цементной, песочной и мучной пыли. Для определения размера частиц пыли и ее дисперсности использовался импактор конструкции НИИОГаз. В качестве размера частиц пыли принят медианный размер. Для характеристики сыпучести пыли использован угол естественного откоса. Плотность пыли оценивалась истинной и насыпной плотностью. Отбор проб проводился аспиратором через пылеотборные трубки [10, 11]. После каждого эксперимента фильтрующая перегородка очищалась от уловленной пыли, во время опыта регенерация не проводилась.

Методами исследований являлись экспериментальное изучение и теоретический анализ процессов фильтрования запыленных газов через фильтрующую щелевую перегородку.

Обсуждение результатов

Известно [12], что фильтрование может протекать с образованием осадка на лобовой поверхности фильтрующей перегородки или с закупориванием пор при накоплении осадка внутри каналов фильтрующего слоя. Исследование фильтрования щелевой перегородкой показало, что процесс протекает в ламинарном режиме. Начальный период фильтрования соответствует стационарному процессу фильтрования [13]. В этот период пыль осаждается как на поверхности перегородки, так и в ее каналах. При постоянной скорости фильтрования при осаждении пыли происходит непрерывное возрастание давления потока, что должно влиять на перемещение пыли внутрь щелевого слоя [14].

Прирост сопротивления при фильтровании с образованием осадка зависит не от характеристик щелевой перегородки, а от удельного сопротивления пылевого осадка. При фильтровании с постепенным закупориванием каналов щелевой перегородки на прирост сопротивления влияет уменьшение сечения щелевых каналов при накоплении в них пыли.

Если принять вариант фильтрования с образованием осадка, то в соответствии с уравнением Дарси [12, 15] гидравлическое сопротивление фильтра при улавливании пыли можно представить как сумму сопротивления чистой фильтрующей перегородки $\Delta P_{\text{ч}}$ и сопротивления слоя осадка $\Delta P_{\text{ос}}$:

$$\Delta P = \Delta P_{\text{ч}} + \Delta P_{\text{ос}}. \quad (1)$$

Определение гидравлического сопротивления чистой фильтрующей щелевой перегородки рассмотрено в работе [16]. Для выяснения величины сопротивления слоя осадка при улавливании пыли в щелевом фильтре используем уравнение Пуазейля, в соответствии с которым расход газа через один канал при ламинарном течении составит [15]:

$$\frac{V}{\tau} = \frac{\pi \Delta P_{\text{ос}} d^4}{128 \mu l},$$

где V – объем фильтрата, м^3 ; τ – время, с; d – диаметр канала, м; μ – динамическая вязкость потока, $\text{Па}\cdot\text{с}$; l – длина канала, м.

Это уравнение получено для условий ламинарного течения несжимаемой жидкости в прямом канале круглого сечения. Ламинарный режим в процессах фильтрования оценивается по Карману [17] критерием $\text{Re} < 20\text{--}40$, при

$$\text{Re} = \frac{W d \rho_{\text{г}}}{\mu} \frac{\varphi}{1 - \varepsilon_0},$$

где φ – фактор формы; ε_0 – доля свободного объема фильтрующей перегородки, $\text{м}^3/\text{м}^3$; $\rho_{\text{г}}$ – плотность газа, $\text{кг}/\text{м}^3$; W – скорость потока в каналах, $\text{м}/\text{с}$.

Применительно к щелевому слою критерий Рейнольдса выразится уравнением

$$\text{Re}_{\text{щк}} = \frac{W_0 d_{\text{щ}} \rho_{\text{г}}}{\varepsilon_0 \mu} \frac{\varphi}{1 - \varepsilon_0},$$

где W_0 – фиктивная скорость потока (скорость фильтрования), $\text{м}/\text{с}$; $d_{\text{щ}}$ – эквивалентный диаметр каналов щелевой перегородки, м.

Применительно к пылевому осадку критерий Рейнольдса выразится уравнением

$$\text{Re}_{\text{пк}} = \frac{W_0 d_{\text{п}} \rho_{\text{г}}}{m \mu} \frac{\varphi}{1 - m},$$

где $d_{\text{п}}$ – эквивалентный диаметр каналов в пылевом осадке, м; m – пористость пыли, $\text{м}^3/\text{м}^3$.

Для извилистого канала пылевого слоя его длина с учетом кривизны будет равна:

$$l = \xi_{\text{п}} h,$$

где $\xi_{\text{п}}$ – коэффициент извилистости канала пылевого слоя; h – толщина пылевого осадка, м.

Для стационарного периода фильтрования можно принять, что живое сечение и скорость потока в каналах фильтрующей перегородки не изменяются. Если принять пыль монодисперсной с частицами шарообразной формы и обозначить через $N_{\text{п}}$ число каналов в пылевом слое, образовавшемся на 1 м^2 фильтрующей поверхности F , то расход газа через эти каналы, в соответствии с уравнением Пуазейля, составит:

$$\frac{V}{F m \tau} = \frac{\pi \Delta P_{\text{ос}} d^4 N_{\text{п}}}{128 \mu \xi_{\text{п}} h},$$

где d – размер канала в пылевом слое, м.

Считая осадок несжимаемым, выразим толщину слоя пыли h , поступившей в каналы щелевой перегородки через объем осадка пыли, образующийся при фильтровании:

$$h = \frac{V\bar{\alpha}_o \tau}{F(1-m)\tau},$$

где x_o – объемная доля пыли в потоке, поступившей в каналы перегородки, $\text{м}^3/\text{м}^3$; τ – продолжительность цикла фильтрования, с.

Используя канальную модель пылевого осадка, выразим число каналов N_{π} на 1 м^2 несжимаемого осадка как отношение свободного сечения фильтрующей перегородки $S_{\text{св}}$ к сечению одного канала пылевого осадка S_{κ} :

$$N_{\pi} = \frac{S_{\text{св}}}{S_{\kappa}} = \frac{4Fm}{\pi d^2} = \frac{4\delta}{\pi d^2},$$

где F – поверхность фильтрующей перегородки, равная 1 м^2 .

Тогда уравнение Пуазейля примет следующий вид:

$$\frac{V}{Fm\tau} = \frac{\pi \Delta P_{\text{ос}} d^4 4mF(1-m)\tau}{128\mu\xi_{\pi}\pi d^2 Vx_o \tau} \Delta P = 1/(A - C\tau)^2$$

или

$$\frac{V^2}{F^2 m^2 \tau^2} = \frac{\Delta P_{\text{ос}} d^2 (1-m)}{32\mu\xi_{\pi}\bar{\alpha}_o \tau}. \quad (2)$$

Выразим размер каналов пылевого слоя как эквивалентный диаметр

$$d = 4m / f_{\pi},$$

где f_{π} – удельная поверхность пылевого осадка, $\text{м}^3/\text{м}^3$.

Тогда число каналов на 1 м^2 пылевого осадка

$$N_{\pi} = f_{\pi}^2 / (4\pi m). \quad (3)$$

Если подставим в уравнение (2) полученное число каналов и учтем, что левая часть этого уравнения представляет истинную скорость потока в каналах фильтрующей перегородки W , получим

$$W^2 = \frac{\Delta P_{\text{ос}} d^2 (1-m)}{32\mu\xi_{\pi}\bar{\alpha}_o \tau}. \quad (4)$$

Обозначим в этом уравнении через r_o комплекс величин правой части уравнения, характеризующих свойства пыли:

$$r_o = \frac{32\xi_{\pi}}{d^2(1-m)} = \frac{2\xi_{\pi}f_{\pi}^2}{m^2(1-m)}.$$

Этот комплекс является удельным сопротивлением пылевого осадка. Заменим в этом комплексе диаметр канала на эквивалентный диаметр каналов пылевого слоя:

$$r_o = \frac{2\xi_{\pi}f_{\pi}^2}{m^2(1-m)}. \quad (5)$$

Коэффициент кривизны каналов слоя пыли рассчитывается [18] по уравнению

$$\zeta_{\pi} = 1 + [(\pi/2) - 1](1-m)^{2/3}.$$

Удельную поверхность слоя пылевого осадка из шарообразных частиц можно рассчитать по уравнению

$$f_{\pi} = f_{\text{ч}} + n_{\text{ч}},$$

где $f_{\text{ч}}$ – поверхность частицы пыли; $n_{\text{ч}}$ – количество частиц пыли в слое.

Поверхность шарообразной частицы диаметром $d_{\text{ч}}$ равна:

$$f_{\text{ч}} = \pi d_{\text{ч}}^2.$$

Число таких частиц, составит:

$$n_{\text{ч}} = (1-m)/V_{\text{ч}} = 6(1-m)/(\pi d_{\text{ч}}^3),$$

где $V_{\text{ч}}$ – объем пылевой частицы, м^3 .

Окончательно удельная поверхность пылевого осадка определится уравнением

$$f_{\pi} = 6(1-m)/d_{\text{ч}}.$$

Если в качестве диаметра частиц принять медианный размер пыли (δ_{50}), то

$$f_{\pi} = 6(1-m)/\delta_{50}.$$

Используя удельное сопротивление осадка, преобразуем уравнение (4) к следующему виду:

$$\Delta P_{\text{ос}} = r_o \mu x_o W^2 \tau.$$

Объемную долю пыли в потоке, поступившей на фильтрацию, можно выразить через массовую концентрацию запыленного потока $Z_{\text{вх}}$, а истинную скорость потока – через скорость фильтрования (W_o). Опытные исследования показали, что при фильтровании не вся пыль осаждается в щелевой перегородке. Значительная ее часть выпадает из потока в корпусе аппарата, не доходя до фильтрующего слоя. Измерениями массы пыли, осевшей в щелях и на поверхности щелевой перегородки, установлено, что ее количество в среднем составляло около половины поступающей в аппарат пыли. Для учета этого фактора, а также влияния дисперсности и отличия пылевых частиц от шарообразной формы предложено в уравнение, определяющее прирост гидравлического сопротивления, ввести поправочный коэффициент k_{π} , тогда

$$\Delta P_{\text{ос}} = k_{\pi} r_o \mu Z_{\text{вх}} W_o^2 \tau / (\rho_{\pi} m^2). \quad (6)$$

Для расчета удельного сопротивления в литературе имеется ряд зависимостей, из которых наиболее известными и достаточно надежными являются уравнения Эргана и Козени–Кармана [19].

По уравнению Эргана

$$r_o = 150\varphi(1-m)^2 / (m^3\delta^2), \quad (7)$$

где φ – коэффициент формы частиц; δ – размер частиц пыли, м.

На основе уравнения Козени–Кармана

$$r_o = K_k f_{\pi}^2 (1-m)^2 / m^3, \quad (8)$$

где K_k – константа, которую ориентировочно рекомендуется принимать в пределах 4–5.

В табл. 1 представлено сравнение опытных удельных сопротивлений различной пыли, которые рассчитаны по уравнению (5), а также по уравнениям Эргана (7) и Козени–Кармана (8). Опытные значения удельного сопротивления определялись измерением гидравлического сопротивления, сформированного на тканевой подложке слоя пыли и рассчитанного на основе уравнения фильтрации [13]:

$$r_o = \frac{\Delta P m}{\mu W_o h}.$$

Таблица 1. Удельное сопротивление пылевых осадков
Table 1. Resistivity of dust precipitation

Осадок пыли Dust precipitate	$\rho_{\text{п}}$, кг/м ³ (kg/m ³)	δ_{00} , мкм (μm)	$Re_{\text{пк}}$	Удельное сопротивление $r_0 \cdot 10^{-11}$, м ² Resistivity $r_0 \cdot 10^{-11}$, m ²			
				опытное experi- mental	рассчитанное по уравнению designed by the equation		
					(5)	(7)	(8)
Гипохлорит Hypochlorite	1644	32	0,10	5,03	4,69	4,83	7,89
Дробленный песок Crushed sand	1550	40	0,13	2,67	2,36	2,33	3,15
	1550	30	0,17	2,84	2,99	2,76	2,81
Цемент Cement	2900	15	0,09	13,20	10,70	9,60	8,90
Мука Flour	933	40	0,15	2,62	1,80	1,70	1,82

Данные табл. 1 показывают, что предложенная зависимость (5) для расчета удельного сопротивления осадка хорошо согласуется с уравнениями Козени–Кармана и Эргана и опытными данными. Значения критерия $Re_{\text{нк}}$ соответствуют ламинарному режиму фильтрации, и при его расчете для всех пылей фактор формы φ принят равным 0,8.

Для расчета гидравлического сопротивления при фильтрации с закупориванием пор используется зависимость [13]

$$\Delta P = 1 / (A - C\tau)^2, \quad (9)$$

где

$$A = (1 / \Delta P_c)^{0.5}.$$

Зависимость (9) получена на основе уравнения Гагена–Пуазейля для фильтрации суспензий в условиях ламинарного режима при постоянной скорости фильтрации, после преобразования уравнения

$$C\tau = (1 / \Delta P_c)^{0.5} - (1 / \Delta P)^{0.5}.$$

Коэффициент C в уравнении (9) определяется по зависимости

$$C = \frac{x_o}{\pi \ell} \left(\frac{\pi W_o}{8 \mu \ell N_k} \right)^{0.5}, \quad (10)$$

где ℓ – длина канала щелевой перегородки, м; N_k – число каналов на 1 м² щелевой перегородки, которое по аналогии с зависимостью (3) предлагается рассчитывать по уравнению

$$N_k = f_{\text{щп}}^2 / (4\pi \varepsilon_o),$$

где $f_{\text{щп}}$ – удельная поверхность проволоки в щелевой перегородке.

$$f_{\text{щп}} = 4 / d_{\text{пр}},$$

где $d_{\text{пр}}$ – диаметр проволоки, м.

Примем для оценки запыленности потока не объемную x_o , а массовую концентрацию $Z_{\text{вх}}$ и введем поправочный коэффициент k_n , аналогично уравнению (6), тогда уравнение (10) примет вид:

$$C = \frac{k_n Z_{\text{вх}}}{\pi \ell \rho_n} \left(\frac{\pi W_o}{8 \mu \ell N_k} \right)^{0.5}. \quad (11)$$

Длину каналов выразим с учетом их кривизны с помощью зависимости

$$\ell = \xi_k \bar{\ell}.$$

где H – толщина фильтрующей перегородки; ξ_k – коэффициент извилистости каналов щелевого слоя, который можно рассчитать [18] из уравнения

$$\xi_k = 1 + [(\pi / 2) - 1](1 - \varepsilon_o)^{2/3}.$$

Толщина фильтрующей перегородки зависит от способа намотки слоев проволоки. Для коридорной намотки

$$H = n d_{\text{пр}} + h_c (n - 1),$$

где n – число слоев в перегородке; h_c – размер щели между слоями проволоки, м.

Толщина перегородки при шахматной намотке

$$H = n d_{\text{пр}} + h_c (n - 1) - 0,1316 d_{\text{пр}} (n - 1).$$

Прирост гидравлического сопротивления при фильтрации с закупориванием пор определяется из уравнения (1)

$$\Delta P_{\text{ос}} = \Delta P - \Delta P_c, \quad (12)$$

в котором общее сопротивление ΔP рассчитывается с использованием уравнений (9) и (11), а сопротивление чистой щелевой перегородки ΔP_c находится по зависимости, полученной на основе уравнения М.Э. Аэрова [20], в соответствии с рекомендациями [16].

Для проверки более вероятного механизма фильтрации в щелевом фильтре были проведены экспериментальные исследования гидравлического сопротивления на лабораторной установке при улавливании из воздуха муки, измельченного песка, цемента и порошкообразного нейтрального гипохлорита кальция. Визуальная оценка результатов фильтрации показала, что в реальности вид кривой накопления осадка пыли не соответствует ни механизму с образованием осадка, ни с закупориванием пор. Установлено, что до 40–60 % поступающей пыли задержи-

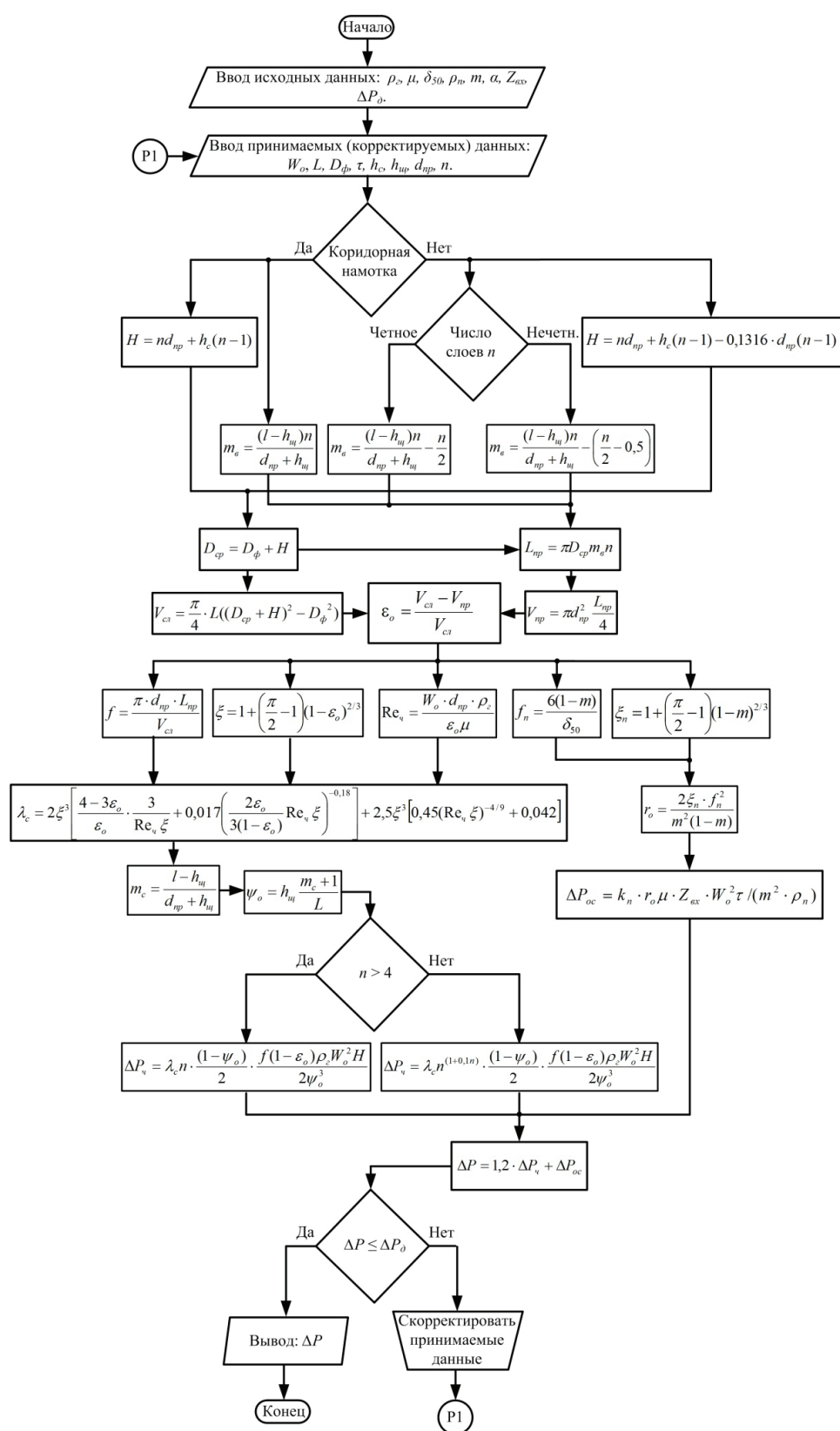


Рисунок. Блок-схема расчета гидравлического сопротивления щелевого фильтра

Figure. Block diagram for calculating the hydraulic resistance of slotted filter

вается не в каналах перегородки и на ее поверхности, а осажается в фильтре, не доходя до перегородки, и не влияет на прирост сопротивления. На основании этого предложено поправочный коэффициент k_{π} в уравнениях (6) и (11) принять равным 0,5.

Таблица 2. Сравнение опытных и рассчитанных значений прироста гидравлического сопротивления

Table 2. Comparison of experimental and calculated values of gain hydraulic resistance

Пыль Dust	$\delta_{\text{ш}}$, мкм (μm)	W_0 , м/с (mps)	$Re_{\text{шк}}$	$d_{\text{шр}}$, мм (mm)	n , шт (pcs)	$Z_{\text{шк}}$, г/м ² (g/m ²)	Прирост сопротив- ления $\Delta P_{\text{ос}}$, Па Resistance gain, Pa		
							опытный experimental	рассчитанный по уравнению designed by the equation	
								(6)	(12)
Мука Flour	40	0,0378	2,8	0,75	2	17,8	68,7	56,4	1153,0
Песок Sand		0,0378	2,9			23,3	110,0	102,3	224,8
		0,0545	4,2			23,0	168,7	178,7	542,8
Цемент Cement	30	0,0512	6,2	1,2	4	3,6	74,2	87,8	175,1
	15	0,0545	4,2	26,8		220,1	246,4	132,4	
Гипохлорит Hypochlorite	32	0,0378	2,9	0,75			23,4	200,1	229,1

Для условий экспериментальных исследований были проведены сравнительные расчеты прироста гидравлического сопротивления по зависимости (6) для фильтрования с образованием осадка и для фильтрования с закупориванием пор по уравнению (12). Опытные результаты исследований и расчетные данные представлены для сравнения в табл. 2. Фактор формы проволоки принимался равным единице.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Фильтр для очистки газа от пыли: пат. № 156669 Российская Федерация / Н.М. Самохвалов, В.В. Виноградов, Ю.А. Зыкова; заяв. 30.03.2015; опубл. 10.11.2015, Бюл. № 31. – 2 с.
2. Gang Xiao, Xihui Wang, Jiapeng Zhang, Mingjiang Ni, Xiang Gao, Zhongyang Luo, Kefa Cen Granular bed filter: A promising technology for hot gas clean-up // Powder Technology. – 2013. – V. 244. – № 8. – P. 93–99.
3. Красовицкий Ю.В., Дуров В.В. Обеспыливание газов зернистыми слоями. – М.: Химия, 1991. – 91 с.
4. Guo-hua Yang, Jiang-hua Zhou. Experimental Study on a New Dual-Layer Granular Bed Filter for Removing Particulates // Journal of China University of Mining & Technology. – 2007. – V. 17. – № 2. – P. 201–204.
5. Henriquez V., Macias-Machin A. Hot gas filtration, using a moving bed heat exchanger-filter (MHEF) // Chemical Engineering and processing. – 1997. – V. 36. – Iss. 5. – P. 353–361.
6. Lawrence K., Norman C., Yung-Tse Hung. Air Pollution Control Engineering. – New York: Humana Press Inc., 2004. – 628 p.
7. Анжеевров Н.М., Вальдберг А.Ю., Красовицкий Ю.В. Анализ современного состояния теории процесса фильтрации аэрозо-

Сравнение показало, что для представленных условий эксперимента лучшая сходимость опытных и расчетных данных наблюдается для механизма фильтрования с образованием осадка. Для фильтрования с закупориванием пор погрешность очень высока. Это указывает на то, что в щелевом фильтре при фильтровании, особенно с высокой скоростью, затруднено закупоривание пор. Отчасти это связано с малой толщиной фильтрующей перегородки, в которой под действием возрастающего давления поток выдувает часть уловленной пыли из щелевых каналов. Кроме этого часть пыли осажается на лобовой поверхности. При расчетах же считается, что вся поступившая в щелевой слой пыль осажается в каналах. В результате расчетное сопротивление по механизму фильтрования с закупориванием пор в основном больше опытного.

На основе результатов теоретических и экспериментальных исследований предлагается для расчета прироста гидравлического сопротивления при улавливании пыли в щелевом фильтре использовать уравнение (6), которое описывает изменение прироста сопротивления при фильтровании с образованием осадка. Предложенная математическая модель положена в основу методики расчета гидравлического сопротивления щелевого фильтра при очистке запыленных газов. Алгоритм такого расчета на ЭВМ представлен в виде блок-схемы (см. рисунок).

Выводы

Разработанная методика расчета позволяет рассчитать гидравлическое сопротивление щелевого фильтра с учетом характеристик фильтрующей перегородки и физических свойств пыли и газа в зависимости от скорости потока, продолжительности очистки и запыленности газа. Расхождение между опытными и расчетными данными составляет в среднем не более 10 %.

лей (применительно к практике инженерных расчетов) // Научные и технические аспекты охраны окружающей среды: обзорная информация. – М.: РАН ВИНТИ, 2000. – С. 24–42.

8. Yi-Shun Chen, Yau-Pin Chyou, Shu-Che Li Hot gas clean-up technology of dust particulates with a moving granular bed filter // Applied Thermal Engineering. – 2015. – V. 74. – Iss. 5. – № 1. – P. 146–155.
9. Measurement and correlation of hydraulic resistance of flow through woven metal screens / W.T. Wu, J.F. Liu, W.J. Li, W.H. Hsieh // International Journal of Heat and Mass Transfer. – Elsevier: Philadelphia Vol. 48, Iss. 14, July 2005, P. 3008–3017
10. Биргер М.И. Справочник по пыле- и золоулавливанию. – М.: Энергоатомиздат, 1983. – 320 с.
11. Trevor S., George C. Filters and Filtration Handbook (Sixth Edition). – Philadelphia: Elsevier Ltd, 2015. – P. 444.
12. Жужиков В.А. Фильтрование. Теория и практика разделения суспензий. – М.: Химия, 1971. – 440 с.
13. Самохвалов Н.М., Виноградов В.В. Стационарность процесса и эффективность очистки газов от пыли в щелевом фильтре // Теоретические основы химической технологии. – 2014. – Т. 48. – № 6. – С. 1–5.

14. Lei Guan, Zhongzhu Gu, Zhulin Yuan, Linjun Yang. Numerical study on the penetration of ash particles in a three-dimensional randomly packed granular filter // *Fuel*. – 2016. – V. 163. – Iss. 1. – № 1. – P. 122–128.
15. Касаткин А.Г. Основные процессы и аппараты химической технологии. – М.: Химия, 1973. – 752 с.
16. Виноградов В.В., Зыкова Ю.А., Самохвалов Н.М. Влияние структуры щелевого фильтра на гидравлическое сопротивление // *Механика жидкости и газа*. – 2015. – № 6 – С. 3–10.
17. Романков П.Г., Курочкина М.И. Гидромеханические процессы химической технологии. – Л.: Химия, 1982. – 288 с.
18. Островский Г.М. Пневматический транспорт сыпучих материалов в химической промышленности. – Л.: Химия, 1984. – 104 с.
19. Ужов В.Н., Мягков Б.И., Вальдберг А.Ю. Очистка промышленных газов от пыли. – М.: Химия, 1981. – 392 с.
20. Аэров М.Э., Тодес О.М. Гидравлические и тепловые основы работы аппаратов со стационарным и кипящим зернистым слоем. – М.: Химия, 1968. – 510 с.

Поступила 02.03.2016 г.

Информация об авторах

Зыкова Ю.А., старший преподаватель кафедры химической технологии неорганических веществ и материалов Иркутского национального исследовательского университета.

Самохвалов Н.М., кандидат технических наук, профессор кафедры химической технологии неорганических веществ и материалов Иркутского национального исследовательского технического университета.

Виноградов В.В., аспирант кафедры химической технологии неорганических веществ и материалов Иркутского национального исследовательского технического университета.

UDC 532.5.013.12: 532.559.8

DUST LAYER RESISTANCE IN THE SLOTTED FILTER

Yulia A. Zykova¹,
ulya2279@mail.ru

Nikolay M. Samokhvalov¹,
htnv@istu.edu

Vladimir V. Vinogradov¹,
vvv158@mail.ru

¹ Irkutsk National Research Technical University,
83, Lermontov street, Irkutsk, 664074, Russia.

Relevance of the work. Natural gas produced from wells in the fields, is not a commodity product, as it contains a lot of impurities, including mechanical ones. Therefore, the produced gas is directed to the gas treatment units. One of the stages of the technological cycle is decontamination. Relevance of the research is caused by the need to study the hydraulic resistance of the dust precipitate in the new device for cleaning dusty gases by filtration – slotted filter, which has not been previously studied. The existing methods of calculating the gain of hydraulic resistance are not useful for the dust collecting devices.

The main aim of the research is to carry out the laboratory testing of the slotted filter for identifying the options of precipitate formation and their mathematical description, and development of methodology for calculating a gain of hydraulic resistance when cleaning dusty gases.

Research methods are based on the results of physical modeling of dusty gases filtration to determine the gain of hydraulic resistance and on theoretical analysis of the Darcy equation for mechanisms of precipitation and pore clogging with respect to the slotted filter.

Results. The paper introduces theoretical calculations based on hydraulic resistance when cleaning dusty gases in the slotted filter for filtering mechanisms with precipitation and pore clogging, derived from Poiseuille equation changes. The authors have considered a comparison of the calculated data with the experimental ones using these equations. It is shown that precipitation mechanism convergence of the calculated and the experimental resistance gain is on the average of 10 % and there was significant deviation over 100 % in pore clogging mechanism convergence. The paper introduces the dependence on calculation of dust layer resistivity, which takes into account the curvature of the channels in the dust layer in contrast to the Ergun and Kozeny–Karman equations. The authors proposed the mathematical model, which takes into account the filtering mechanism to form a precipitate, which is the basis for calculating the hydraulic resistance of the slotted filter.

Conclusions. The developed calculation method allows calculating with a reasonable degree of accuracy the hydraulic resistance of the slotted filter considering the characteristics of the filter septum and physical properties of dust and gas, depending on the flow rate, duration of gas and dust cleaning. The technique allows simulating and designing a slotted filter with minimum hydraulic resistance, thereby reducing operating costs.

Key words:

Slotted filter, hydraulic resistance, filtration, pore clogging, precipitation, dust cleaning.

REFERENCES

- Samokhvalov N.M., Vinogradov V.V., Zykova Yu.A. *Filtr dlya ochistki gaza ot pyli* [Filter for gas cleaning from dust]. Patent RF, no. 156669, 2015.
- Gang Xiao, Xihui Wang, Jiapeng Zhang, Mingjiang Ni, Xiang Gao, Zhongyang Luo, Kefa Cen. Granular bed filter: a promising technology for hot gas clean-up. *Powder Technology*, 2013, vol. 244, no. 8, pp. 93–99.
- Krasovitskiy Yu.V., Durov V.V. *Obespylivaniye gazov zernistymi slojami* [Gas dedusting with granular layers]. Moscow, Khimiya Publ., 1991. 91 p.
- Guo-hua Yang, Jiang-hua Zhou. Experimental Study on a New Dual-Layer Granular Bed Filter for Removing Particulates. *Journal of China University of Mining & Technology*, 2007, vol. 17, no. 2, pp. 201–204.
- Henriquez V., Macias-Machin A. Hot gas filtration, using a moving bed heat exchanger-filter (MHEF). *Chemical Engineering and processing*, 1997, vol. 36, Iss. 5, pp. 353–361.
- Lawrence K., Norman C. Yung-Tse Hung. *Air Pollution Control Engineering*. New York, Humana Press Inc Publ., 2004. 628 p.
- Anzheurov N.M., Valdborg A.Yu., Krasovitskiy Yu.V. Analiz sovremennogo sostoyaniya teorii protsessa filtratsii aerozoley (primenitelno k praktike inzhenernykh raschetov) [Analysis of the current state of the theory of aerosol filtration (with reference to the practice of engineering calculations)]. *Nauchnyye i tekhnicheskiye aspekty okhrany okruzhayushchey sredy: obzornaya informatsiya* [Scientific and engineering aspects of environment protection: review]. Moscow, RAN. VINITI Publ., 2000. pp. 24–42.
- Yi-Shun Chen, Yau-Pin Chyou, Shu-Che Li. Hot gas clean-up technology of dust particulates with a moving granular bed filter. *Applied Thermal Engineering*, 2015, vol. 74, no. 1, pp. 146–155.
- Wu W.T., Liu J.F., Li W.J., Hsieh W.H. Measurement and correlation of hydraulic resistance of flow through woven metal screens. *International Journal of Heat and Mass Transfer*, 2005, vol. 48, Iss. 14, pp. 3008–3017.
- Birger M.I. *Spravochnik po pyle- i zoloulavlivaniyu* [Handbook of dust and ash collection]. Moscow, Energoatomizdat Publ., 1983. 320 p.
- Trevor S., George C. *Filters and Filtration Handbook (sixth ed.)*. Philadelphia, Elsevier Ltd Publ., 2015. 444 p.
- Zhuzhikov V.A. *Filtrovaniye. Teoriya i praktika razdeleniya suspenziy* [Filtration. Theory and practice of separation of suspensions]. Moscow, Khimiya Publ., 1971. 430 p.
- Samokhvalov N.M., Vinogradov V.V. очистки газов от пыли в целевом фильтре Stationary and Efficiency of Gas Dusting in

- Slotted Filter. *Theoretical Foundations of Chemical Engineering*, 2014, vol. 48, no. 6, pp. 837–841. In Rus.
14. Lei Guan, Zhongzhu Gu, Zhulin Yuan, Linjun Yang. Numerical study on the penetration of ash particles in a three-dimensional randomly packed granular filter. *Fuel*, 2016, vol. 163, no. 1, pp. 122–128.
 15. Kasatkin A.G. *Osnovnye protsessy i apparaty khimicheskoy tekhnologii* [Basic processes and apparatuses of chemical technology]. Moscow, Khimiya Publ., 1973. 752 p.
 16. Vinogradov V.V., Zykova Yu.A., Samokhvalov N.M. Effect of the Slot Filter Structure on Hydraulic Resistance. *Fluid Dynamics*, 2015, vol. 50, no. 4, pp. 463–470. In Rus.
 17. Romankov P.G., Kurochkina M.I. *Gidromekhanicheskie protsessy khimicheskoy tekhnologii* [Hydro-mechanical processes of chemical technology]. Leningrad, Khimiya Publ., 1982. 288 p.
 18. Ostrovskiy G.M. *Pnevmaticheskiy transport sypuchikh materialov v khimicheskoy promyshlennosti* [Pneumatic transport of bulk materials in chemical industry]. Leningrad, Khimiya Publ., 1984. 104 p.
 19. Uzhov V.N., Myagkov B.I., Valdberg A.Yu. *Ochistka promyshlennykh gazov ot pyli* [Industrial gases dusting]. Moscow, Khimiya Publ., 1981. 392 p.
 20. Aerov M.E., Todes O.M. *Gidravlicheskie i teplovye osnovy raboty apparatov so statsionarnym i kipyashchim zernistym slozem* [Hydraulic and thermal basic operation of devices with fixed and fluidized granular layer]. Moscow, Khimiya Publ., 1968. 510 p.

Received: 2 March 2016.

Information about the authors

Yulia A. Zykova, senior teacher, Irkutsk National Research Technical University.

Nikolay M. Samokhvalov, Cand. Sc., professor, Irkutsk National Research Technical University.

Vladimir V. Vinogradov, postgraduate student, Irkutsk National Research Technical University.